

## ESTUDIO DE REFLECTANCIA DE ESPEJOS PARA UN CONCENTRADOR SOLAR FRESNEL LINEAL

M. Hongn, S. Flores Larsen<sup>1</sup>, M. Altamirano<sup>2</sup>, M. Gea, L. Saravia<sup>3</sup>

Instituto de Energías no Convencionales (INENCO) – Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta–  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
Avenida Bolivia 5150 - C.P. 4400 – Salta Tel. 54-387-4255424 – Fax 54-387-4255489  
E-mail: marcoshongn@gmail.com

**RESUMEN:** En este trabajo se presenta el diseño de un equipo destinado a la medición de la reflectancia especular y los resultados obtenidos para superficies espejadas de distintas características ópticas y espesores, para distintos ángulos de incidencia. Esta información es indispensable para determinar la influencia de la reflectancia del material en la eficiencia global de un concentrador Fresnel Lineal. Para ángulos de incidencia entre 35° y 72°, rango de medición del equipo, se obtuvieron valores de reflectancia promedios de 0,82 y 0,77 para espejos comunes de 2 mm y 3 mm de espesor respectivamente, 0,91 y 0,83 para espejos de 4 mm de espesor constituidos por dos soportes de vidrio de calidades diferentes (vidrio “blanco” de alta transparencia y vidrio de calidad intermedia). Los resultados muestran una fuerte dependencia de la reflectancia con la concentración de hierro del vidrio del espejo y con el grado de limpieza de la superficie del mismo.

**Palabras clave:** reflectómetro, reflectancia especular, concentrador Fresnel Lineal.

### INTRODUCCIÓN

Al interactuar con la materia, la luz puede ser absorbida ( $\alpha$ ), transmitida ( $\tau$ ) y reflejada ( $\rho$ ), dependiendo de la longitud de onda de la luz ( $\lambda$ ), del ángulo de incidencia ( $\theta$ ) y de las propiedades del material. En términos generales, la combinación de los parámetros radiativos se expresa como  $\alpha + \tau + \rho = 1$ . Para cuerpos opacos, la transmitancia  $\tau$  se considera nula. La reflectancia  $\rho$  se define como la relación entre la irradiancia (o flujo radiante) reflejada por la superficie y la incidente sobre la misma:

$$\rho = I_{ref} / I_{inc} \quad (1)$$

La reflectancia depende de  $\lambda$  y del ángulo  $\theta$  entre el haz incidente y la normal de la superficie reflectiva. La reflectancia  $\rho$  es una propiedad del material y su distribución es una característica de cuán plana sea la superficie a nivel microscópico. La radiación reflejada por una superficie contiene un componente especular y un componente difuso.

#### Reflexión Difusa

Si un haz de rayos de luz paralelos incide sobre una superficie rugosa, cada rayo incidente se encontrará con una fracción de superficie con pendiente distinta a las demás (SolarPACES, 2011). La ley de la reflexión establece que cada rayo se reflejará con  $\theta_{ref} = \theta_{inc}$  medidos sobre la misma normal de la superficie (figura 1a). De esta manera los ángulos de reflexión serán distintos para cada rayo, de acuerdo a la pendiente de la fracción de superficie con la que interactúe. La luz será dispersada difusamente en todas las direcciones sobre el plano de incidencia (figura 1b).

#### Reflexión Especular

Como se observa en la figura 2a, la reflexión especular describe el caso de reflexión sobre una superficie (a nivel microscópico) perfectamente lisa, cuando un haz de rayos paralelos es reflejado por la superficie como un haz de rayos paralelos según la ley de reflexión. A nivel atómico, no existe en la realidad una superficie perfectamente lisa, por lo que la reflexión especular contiene siempre un pequeño grado de dispersión. Para superficies muy lisas, el resultado del efecto de la dispersión es un ligero ensanchamiento del haz cónico de luz que se refleja en la dirección especular. Del haz de rayos reflejados, la mayoría se reflejan con el ángulo  $\theta_{ref}$  y un conjunto lo hace con un desplazamiento de  $\pm\phi$  de la dirección especular (figura 2b), denominado *ángulo de aceptación*  $\phi$ . En un instrumento utilizado para medir la reflectancia especular, el diseño del instrumento y el tamaño del detector definen el máximo desplazamiento angular  $\phi$  dentro del cual los rayos de luz reflejados son todavía detectados. La reflectancia especular  $\rho_s(\lambda, \theta, \phi)$  puede ser entendida como la cantidad de luz reflejada dentro del ángulo de aceptación  $\phi$  y

<sup>1</sup>Investigador Adjunto CONICET

<sup>2</sup>Becario CONICET

<sup>3</sup>Investigador Principal CONICET

depende de la longitud de onda del flujo radiante incidente, del ángulo de incidencia y del ángulo de aceptación (SolarPACES, 2011).

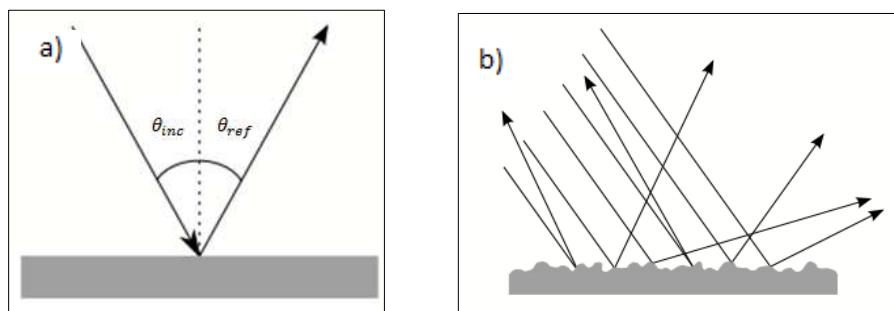


Figura 1: a) Ley de la reflexión, b) Reflexión difusa.

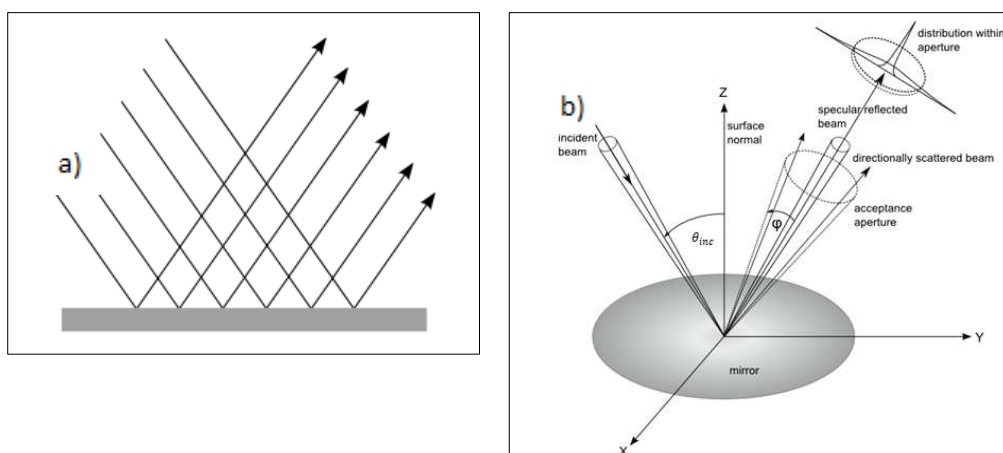


Figura 2: a) Reflexión perfectamente especular, b) Reflexión especular con desplazamiento angular (SolarPACES, 2011).

Trabajos anteriores estudian la reflectancia de los materiales utilizados en sistemas de concentración solares térmicos (Meyen et al., 2010; SolarPACES, 2011; Chen et al., 2003). Se han utilizado reflectómetros y métodos complejos para obtener medidas de reflectancia especular óptimas, en la mayoría de los casos bajo condiciones de laboratorio y en ángulos de incidencia fijos. Son escasas las referencias de medidas de reflectancia para distintos materiales reflectantes en función del ángulo de incidencia. Se encontraron valores de reflectancia para distintos métodos de medición, su variación con la longitud de onda y valores para distintos materiales aunque para ángulos de incidencia establecidos. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un equipo de medida de reflectancia especular en el espectro solar, que permitiera variar el ángulo de incidencia de la radiación, con un método de medición relativamente sencillo y utilizando instrumentos y materiales de bajo costo. Este tipo de instrumento permite la determinación de la reflectancia especular de superficies brillantes, propiedad relevante en el diseño de sistemas solares que utilizan superficies espejadas para redireccionar y concentrar la energía solar (sistemas de iluminación natural para edificios, concentradores parabólicos, concentradores Fresnel lineales, etc.).

Los resultados y conclusiones obtenidos se aplicarán al estudio de un Concentrador Lineal Fresnel, para el cual se requiere conocer el comportamiento de la reflectancia especular del material en función del ángulo de incidencia. Esta propiedad influye en la forma geométrica a dar al concentrador (ángulo de apertura, altura del absorbedor, separación entre espejos, etc.) así como también define las pérdidas ópticas frente a la reflexión de la radiación solar en los espejos. De esta manera, se puede realizar una estimación de la energía captada por el campo de espejos mediante el modelo de estimación de radiación directa que corresponda y luego, mediante los resultados obtenidos en este trabajo, determinar el porcentaje de energía reflejada en función del tipo de espejo utilizado (calidad del vidrio y espesor). Teniendo en cuenta aspectos energéticos y económicos se puede decidir cuál tipo de espejo resulta más conveniente para el sistema de reflexión, dependiendo de las prestaciones para las cuales haya sido diseñado el equipo concentrador.

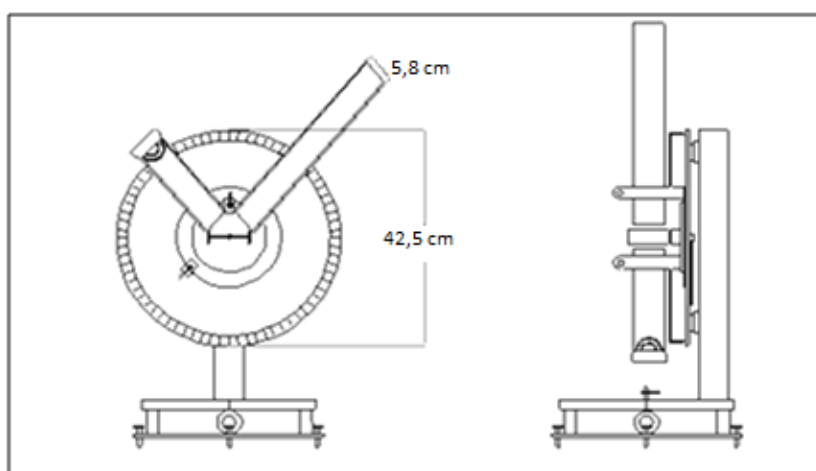
## DESCRIPCION DEL EQUIPO

El reflectómetro fue diseñado por la Dra. Silvana Flores Larsen y el Dr. Luis Saravia y fue construido por el personal del taller del INENCO. Debido a que la radiación solar incidente debe provenir de un haz directo (definido como aquél en donde el ángulo de apertura es menor a  $5,7^\circ$ ), se utiliza un tubo colector de 40 cm de largo y 5 cm de diámetro interior (ver Figura 3). El sensor utilizado es un piranómetro patrón de alta precisión CM21 de Kipp & Zonen (rango 305 nm a 2800 nm). También se realizó una adaptación para acoplar un piranómetro fotovoltaico LICOR modelo LI-200 que, si bien es menos

preciso que el primero, es más simple de manipular y se evita el uso del instrumento patrón para realizar los ensayos. El sensor de radiación se utiliza para medir tanto la radiación incidente como la radiación reflejada por el espejo.

El reflectómetro tiene dos líneas de movimiento para alinearlos según la dirección del haz, una sobre un plano horizontal siguiendo el acimut solar y la segunda en un plano vertical siguiendo la altura solar. Los elementos móviles (tubos y portamuestra) están ubicados en el mismo eje de rotación a fin de asegurar la perfecta alineación de los ejes centrales de los dos tubos. El tubo superior se mueve entre 0 y 90° (0° en posición horizontal) a fin de alinearse con la radiación solar incidente, mientras que el tubo inferior se mueve entre 90° y 180° (para medir reflexión de muestras especulares) o entre 180° y 270° (para medir transmisión de muestras transparentes). Para permitir el movimiento independiente de ambos tubos, se los fijó a discos concéntricos de distinto diámetro, con trabillas que permiten la fijación o liberación de uno (o ambos) tubos según se requiera. El portaobjetos también tiene movimiento y sistema de fijación independiente de los tubos. Durante la construcción, se trabajó con un único tubo que, una vez soldados los soportes de sujeción, fue seccionado en dos partes (de 40 cm y 20 cm respectivamente), a fin de asegurar que el haz directo, los ejes de los tubos colectores y el haz reflejado compartieran el mismo plano. Los tubos pueden ser desplazados en la dirección de sus ejes centrales, de forma de acercarlos o alejarlos de la muestra para impedir el ingreso de radiación difusa del ambiente. El tubo que soporta al sensor posee un orificio de 4 cm de diámetro por el cual se puede observar la mancha de luz reflejada y realizar los ajustes necesarios para que ésta quede perfectamente centrada sobre el sensor. Para impedir el ingreso de radiación difusa al plano del sensor, una vez realizados los ajustes necesarios se coloca un tapón en el orificio.

Los discos concéntricos fueron montados sobre un eje vertical que gira sobre un bastidor cuadrado de caño estructural. Este bastidor posee cuatro pequeñas ruedas que permiten que gire sobre la base (ver Figura 3), a fin de permitir el movimiento acimutal del equipo. La base cuenta con tres apoyos regulables que permiten nivelar el equipo de forma perfectamente horizontal.



*Figura 3: Reflectómetro. Vista frontal (en posición para medida de reflectancia) y vista lateral (tubos en posición vertical).*

Otras características del equipo son:

- Estabilidad a las vibraciones: para minimizar vibraciones o movimientos que interfieran durante la medida se incluyeron elementos macizos constituidos por los discos concéntricos y la base del equipo ambos de hierro (5 mm de espesor para los discos y 20 mm para la base). El peso total del equipo es de aproximadamente 20,5 kg.
- Escala graduada para medición de ángulos: esta escala se ubicó sobre el disco exterior. Se adicionaron en cada brazo de sostén de los tubos sendas agujas que permiten medir los ángulos de los tubos y de la radiación incidente.
- Revestimiento interior negro de los tubos, para evitar reflexiones internas.
- Debido a que, cuando se utiliza un solarímetro térmico, las variaciones de temperatura del cuerpo del piranómetro puede producir errores de offset, se aisló la parte inferior del mismo con poliestireno expandido de 3 cm de espesor.

El método de medida consiste en enfocar en primer lugar el tubo que colecta el haz incidente y alinear el segundo tubo para obtener el valor de irradiancia directa medida por el solarímetro ubicado en el extremo de este último tubo. A continuación se coloca la muestra y se la posiciona según el ángulo de incidencia deseado. Es necesario realinear correctamente el segundo tubo para obtener la energía reflejada por la muestra. Para determinar el ángulo de incidencia  $\theta$ , el equipo cuenta con una escala graduada en la parte frontal del mismo que permite determinar este ángulo con una resolución de 1°. Como se mencionó anteriormente, el portamuestra no está fijo en posición horizontal sino que puede girar para facilitar la variación del ángulo de incidencia.



Figura 4: a) Fotografía del equipo de medida. b) Tubo que contiene el sensor de radiación.

La reflectancia especular de la muestra se calcula como:

$$\rho_s(\theta) = \frac{I_{ref}(\theta)}{I_{inc}(\theta)} \quad (2)$$

Donde  $\rho_s$  es adimensional,  $I_{ref}$  e  $I_{inc}$  son las irradiancias incidente y reflejada por la muestra respectivamente para un ángulo  $\theta$  y sus unidades son  $W/m^2$ .

#### MEDICIONES DE LA REFLECTANCIA ESPECULAR DE VARIOS TIPOS DE ESPEJOS

Para llevar a cabo las medidas de reflectancia se obtuvieron muestras de espejos comunes (vidrio verde) de 2 mm y 3 mm de espesor, se citaran bajo el nombre de muestra *a* y *b* respectivamente, y dos muestras de espejos de 4 mm de espesor, la primera está constituida por un soporte de vidrio con menor contenido de hierro que las anteriores y la segunda muestra es espejo con vidrio blanco (vidrio de alta transparencia), serán renombradas como muestras *c* y *d* respectivamente.

Las medidas se realizaron durante días totalmente despejados, ya que la presencia de nubes o bruma afecta los resultados considerablemente. Se midió la reflectancia para ángulos de incidencia entre 35° y 72°, tomados entre la normal a la superficie y el haz incidente.

El primer ensayo consistió en tomar medidas de reflectancia especular para las muestras *a* y *b*, ensayándose con su superficie totalmente limpia y luego con los espejos cubiertos de polvo, para lo cual se los dejó a la intemperie durante 4 días. Esta información es de suma importancia para espejos utilizados en sistemas de concentradores Fresnel, puesto que si se instalan en lugares secos, es común que soplen vientos que depositan polvo sobre las superficies. El segundo ensayo consistió en medir la reflectancia especular para dos espejos de 4mm de espesor, correspondientes a las muestras *c* y *d*. En total se obtuvieron aproximadamente 170 medidas que se grafican en las Figuras 5 a 8.

Las Figuras 5 y 6 muestran los resultados para las medidas de reflectancia para las muestras *a* y *b*, para vidrios limpios y vidrios cubiertos con polvo. Para el espejo *a* la reflectancia especular varía entre 0,87 y 0,79, mientras que para el espejo *b* varía entre 0,79 y 0,74. Se observa que la presencia de polvo sobre la superficie del vidrio provoca una disminución considerable en los valores de reflectancia de la muestra, entre 14% y 25% para la muestra *a*, y entre 13% y 17% para la *b*. En ambos casos la disminución de reflectancia observada es más significativa para ángulos mayores. Las mediciones confirman la importancia de mantener los espejos lo más limpios posible, para evitar pérdidas considerables de energía.

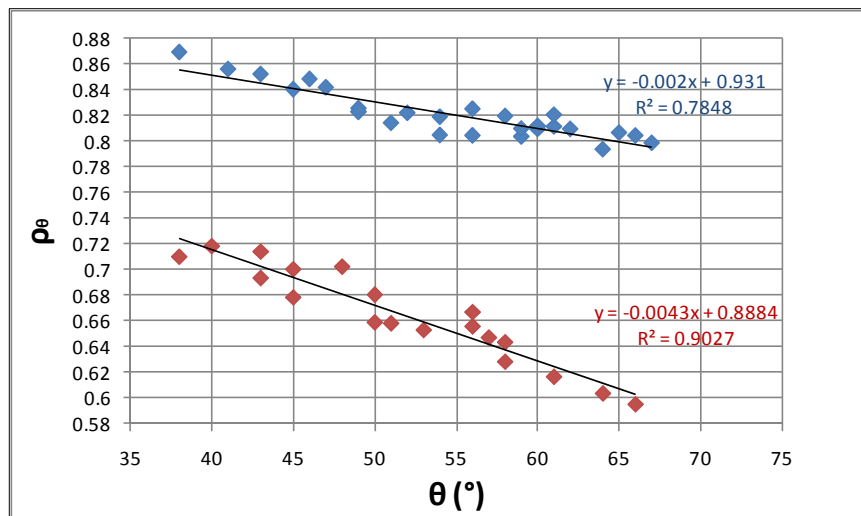


Figura 5: Valores de  $\rho_s$  en función del ángulo de incidencia  $\theta$  para la muestra **a**. Los datos en azul son medidas de reflectancia especular con la superficie del espejo limpia, los de color rojo se obtuvieron con la superficie del espejo cubierta con polvo.

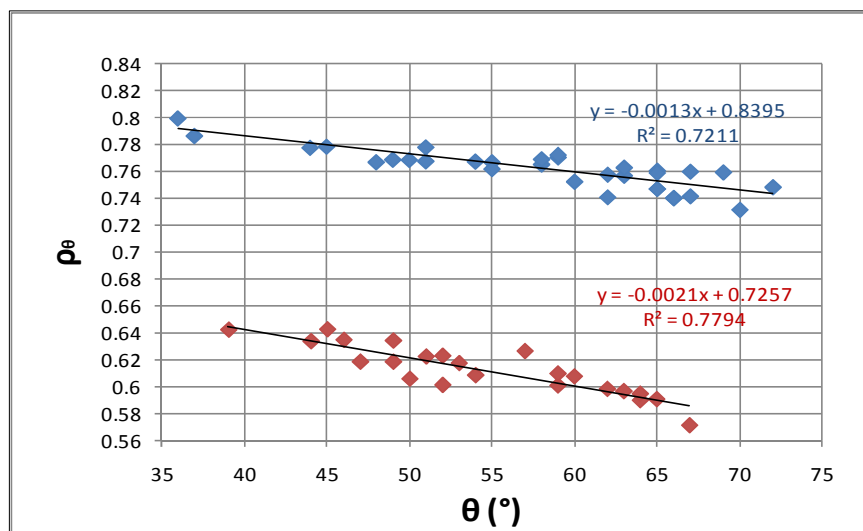


Figura 6: Medidas de reflectancia especular en función de  $\theta$  para la muestra **b**. El color de los datos graficados coincide con el caso anterior.

Las Figuras 7 y 8 muestran los resultados obtenidos para los espejos **c** y **d** que si bien son del mismo espesor, las calidades de sus vidrios son diferentes. Para el espejo **c** la reflectancia oscila entre 0,85 y 0,83, mientras que para el espejo **d** varía entre 0,94 y 0,89. En este caso, como era de esperarse, el espejo con vidrio blanco presenta valores de reflectancia mayores al de ésta última. Además se observa que la variación de la reflectancia con el ángulo de incidencia es mucho menor para el espejo **c** que para todas las otras muestras.

En la Figura 8 se graficaron las medidas para todas las muestras limpias, a fin de poder realizar una comparación entre ellas. El material con mayor reflectancia es la superficie espejada cuyo soporte de vidrio contiene una leve concentración de hierro (muestra **d**), mientras que el de peor comportamiento es el espejo con vidrio común de 3mm (muestra **b**). Es interesante notar que los espejos **a** y **c** presentan valores similares de reflectancia, cuando en realidad se esperarí que éste último tuviera los menores valores. La razón es que la composición del vidrio la muestra **c** es diferente a la de los vidrios de las muestras **a** y **b**, observándose a simple vista que la calidad del vidrio es mejor. Para aquellas muestras con vidrio verde del mismo tipo (muestras **a** y **b**) cobra importancia también el espesor del mismo, puesto que al aumentar éste no sólo se incrementa el camino óptico sino también la cantidad de hierro, lo que provoca una mayor absorción de la radiación solar en el material y por ende un decrecimiento en su transmitancia.

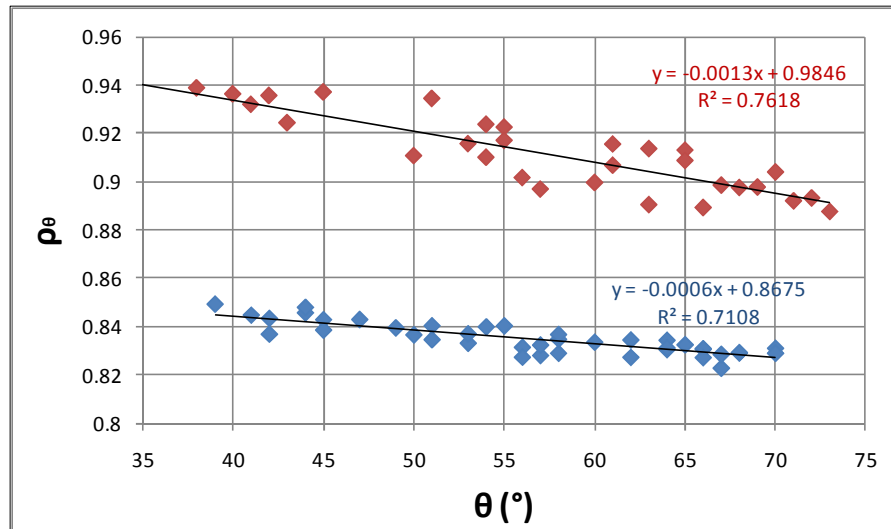


Figura 7: Medidas de reflectancia especular vs ángulo de incidencia, para espejos *c* (serie en azul) y *d* (serie en color rojo).

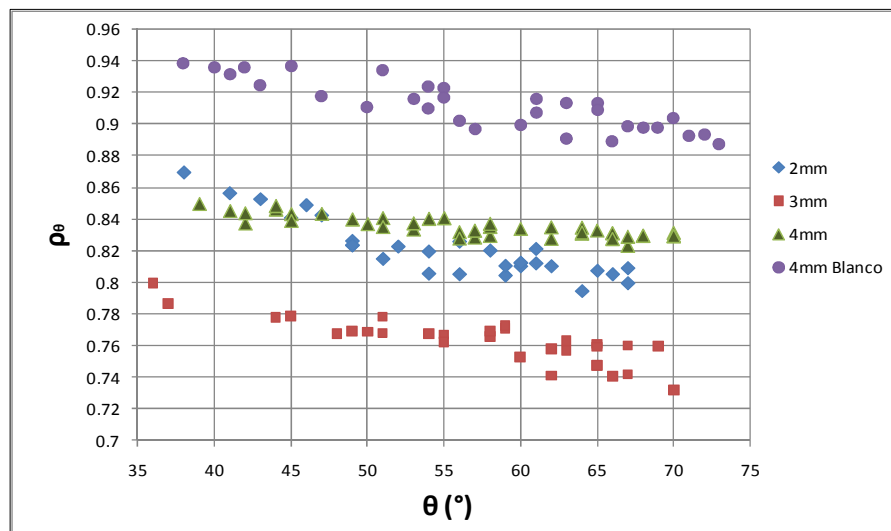


Figura 8: Reflectancia especular en función del ángulo de incidencia, para cada tipo de espejo.

## CONCLUSIONES

El reflectómetro especular diseñado demostró ser útil para determinar la reflectancia direccional de las muestras ensayadas, permitiendo variar el ángulo de incidencia en un rango comprendido entre 35° y 72°. Las características estructurales del equipo no permitieron extender las medidas por encima de los 72° de incidencia. A partir de este ángulo parte del haz incidente es interceptado por las alas del portamuestra provocando un decrecimiento en la cantidad total de radiación solar reflejada. Por su parte, las dimensiones de los tubos de incidencia y de reflexión, que giran en un mismo plano, no permiten obtener ángulos de incidencia menores a 35°. Las curvas determinadas en este trabajo para cada serie de medida representan los valores de  $\rho_s(\theta)$  obtenidos dentro del rango especificado; queda pendiente realizar modificaciones en el equipo o en el procedimiento de medida para determinar los valores de reflectancia direccional para ángulos de incidencia menores que 35° ya que es importante para minimizar los errores en la estimación de energía reflejada por el sistema de concentración en un Concentrador Fresnel Lineal. Al analizar la simulación del movimiento de los espejos del concentrador para distintas fechas y durante todo el día, se puede observar que el mayor ángulo de incidencia es de 68° aproximadamente y se da para los espejos de los extremos. Por lo tanto el ángulo de incidencia varía entre 0° <  $\theta$  < 68° teniendo en cuenta cualquier espejo del sistema y cualquier época del año.

La dispersión observada experimentalmente puede deberse a varios factores, entre los que se cuentan el método de medición, la turbidez del aire, las características del sensor utilizado en las medidas (LI-200 con su correspondiente medidor modelo LI-189), entre otros. En cuanto al sensor, su respuesta espectral no plana y el hecho de que la reflectancia es también función de la longitud de onda, podría influir sobre las medidas. Esta situación será analizada en el futuro. Por otra parte, el haz que incide sobre el sensor debe estar correctamente centrado, ya que frente a pequeños desplazamientos de la mancha de luz se produce una variación importante en los valores de irradiancia medidos.



La variación de la reflectancia especular con el ángulo de incidencia obtenida experimentalmente para los espejos ensayados puede aproximarse con una recta de pendiente negativa para ángulos comprendidos entre 35° y 72°. El material con mejor reflectancia es el espejo con vidrio blanco (0,94 para ángulos de incidencia pequeños), mientras que el espejo con vidrio común de 3mm es el de menor reflectancia (0,8 para ángulos pequeños). El espesor influye en  $\rho$ , puesto que al aumentar el mismo no sólo se incrementa el camino óptico sino también la cantidad de hierro causante de la absorción de parte de la radiación incidente. Para verificar esta hipótesis, en el futuro se intentará obtener valores de la transmitancia de los vidrios de los espejos, solicitando al proveedor información sobre el proceso de fabricación o realizando medidas experimentales de esta propiedad para lo cual se requiere remover la película espejada.

Se observa que la presencia de polvo sobre la superficie del vidrio provoca una disminución considerable en los valores de reflectancia de la muestra: entre 14% y 25% para la muestra *a*, y entre 13% y 17% para la muestra *b*. En ambos casos la disminución de reflectancia observada es más significativa para ángulos mayores. Es de esperar que la forma de la curva de reflectancia vs el ángulo de incidencia sea similar a la de la transmitancia de una cubierta de vidrio, es decir, que tome valores aproximadamente constantes para ángulos de incidencia entre 0° y 60° y luego disminuya para ángulos mayores de manera notoria.

Si bien no se considera la construcción de un Concentrador Fresnel Lineal con espejos de 4mm de espesor, debido a su peso y menor manejabilidad, mediante los resultados obtenidos se puede realizar un análisis para determinar cuál de los materiales reflectantes es el más conveniente, incluyendo en el análisis los aspectos económicos.

## REFERENCIAS

- SolarPACES (2011). Guideline. Measurement of solar weighted reflectance of mirror materials for concentrating solar power technology with commercially available instrumentation. [http://www.solarpaces.org/Tasks/Task3/Reflectance\\_Guideline.pdf](http://www.solarpaces.org/Tasks/Task3/Reflectance_Guideline.pdf). Fecha de acceso: 16/09/2011.
- Meyen S., Fernández-García A., Kennedy C., Lüpfert E. (2010). Standardization of solar mirror reflectance measurements – round robin test. <http://www.nrel.gov/docs/fy11osti/49189.pdf>. Fecha de acceso 16/09/2011.
- Duffie J., Beckman W. (2005). Solar Engineering of Thermal Processes, Third Edition, cap 4-5, John Wiley and Sons.
- Chen Y., Lim B., Lim C., Chong K., Tang B. (2003). High precision (1 part in 10<sup>4</sup>) reflectivity measurement for the study of reflective materials used in solar collectors, Solar Energy Materials & Solar Cells 80, pág. 305-314.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por CIUNSa 1807/2.

## ABSTRACT

This work presents an equipment designed for specular reflectance measurement and results obtained for mirrors with different optical characteristics and thickness, for different angle of incidence. This information is essential to determine the influence of material reflectance in the overall efficiency of a Linear Fresnel Concentrator. For angles of incidence between 35° and 72°, range in the which the equipment allowed to measure, were obtained values of averages reflectance of 0,82 and 0,77 for commons mirror of 2 mm and 3 mm thickness respectively, 0,91 and 0,83 for mirrors of 4 mm thickness composed of two glass supports of different qualities (white glass of highly transparent and intermediate quality glass). Results show strong dependence of reflectance with the concentration of iron of the mirror glass and the grade of clean of the mirror surface.

**Keywords:** reflectometer, specular reflection, Linear Fresnel concentrator.